

# ARQUITECTURAS CUPULIFORMES: EL ARCO, LA BOVEDA Y LA CUPULA

LUIS MOYA BLANCO

## **1. INVENCION PRIMERA DEL SISTEMA ABOVEDADO Y SUCEсивAS INVENCIONES HASTA EL SIGLO ACTUAL. CAUSAS MATERIALES Y ESTETICAS. DE LA CARGA VERTICAL AL EMPUJE**

El origen de la bóveda está en Mesopotamia, según opinión general. Arcos, bóvedas y cúpulas son de ladrillo cocido o de adobe; como mortero se utiliza el mismo barro, o betunes y breas. Los historiadores hacen notar que los sistemas de construcción debieron ser ingeniosos desde el proyecto, pues lo descubierto muestra formas que, salvo los arcos, pueden realizarse sin cimbras ni camones; teniendo en cuenta que no conocían el uso de la rasilla y el yeso, materiales que evitan el empleo de aquellos medios auxiliares en la mayor parte de los casos, se comprende que apelasen a procedimientos insólitos en nuestros días. Por ejemplo, se hacían bóvedas de cañón por arcos sucesivos, puestos según planos inclinados para facilitar la adhesión de cada uno al anterior; abundaban las cúpulas, que siempre se han podido hacer sin cimbras.

Pueblos de prehistoria poco conocida, como los etruscos, hicieron arcos y bóvedas. La «cloaca máxima» de Roma es una de éstas. Parece que en Cartago se hicieron también; incluso se supone que desde aquí, y a través de Sicilia, llegaron a la Grecia de los siglos IV y III. También se conocieron en Egipto desde épocas remotas. La arquitectura romana inventa de nuevo la bóveda, y con importancia excepcional; aunque se fundase en lo etrusco y tuviese noticias de Mesopotamia, sus formas y sistemas constructivos son originales. También lo son las bóvedas bizantinas respecto de las romanas, y de unas y otras se derivan las escuelas posteriores.

Los sistemas árabes y románicos no traen novedades, en principio, pero plantean problemas nuevos que resuelven la casi repentina invención del estilo gótico; éste es un fenómeno asombroso, cuya influencia llega hasta la técnica actual. Comparado con éste, el renacimiento es una regresión a estructuras más toscas, pues no emplea más que una parte de la riqueza de los sistemas romanos, salvo excepciones: las cúpulas de Santa Maria dei Fiori en Florencia y la de San Pedro en Roma. En éstas parece que se aprovecharon las enseñanzas de lo romano y del gótico para llegar a resultar originales.

El barroco continúa lo anterior hasta su fase rococó, en la que se inventa otra vez el sistema abovedado. Desde las obras de Guarini en Turín hasta la riqueza de soluciones que se encuentra en Baviera, todo el centro de Europa parece dedicado en los años alrededor del 1700 a la creación de espacios y de formas nunca vistos antes.

El hierro lleva consigo nuevos tipos de bóvedas. En 1800 Bélanger construye la gran cúpula encristalada del Halle aux Blés de París, con estructura de piezas fundidas, en general, y otras forjadas; reúne la perfección técnica con una gran belleza. Lo mismo puede decirse de la bóveda cilíndrica que cubre la mayor parte del enorme Palacio de Cristal de Londres, obra de Paxton en 1850.

El hormigón armado inicia novedades con las bóvedas de Perret, pero las verdaderas invenciones son las de Félix Candela, con sus paraboloides hiperbólicos y formas análogas; estas bóvedas son las propias del nuevo sistema típico del siglo XX. Pero al mismo tiempo se desarrolla la construcción a la catalana, que desde una remota tradición bizantina llega a novedades formales provocadas muchas veces por la propia técnica del sistema, tal como la permite el uso de la rasilla y el cemento. Guastavino y Gaudí consiguen resultados extraordinarios, que se aprovechan y renuevan a partir de 1939 por los arquitectos de la generación siguiente a la de estos grandes maestros, debido a la escasez de materiales propios de la construcción moderna de hormigón armado.

Respecto de las causas de estas sucesivas invenciones, puede creerse que en general han sido puramente materiales al principio, y que después se han visto sus posibilidades estéticas. Parece, en efecto, que la manera natural y primitiva de cubrir un espacio es colocar una pieza horizontal sobre dos apoyos verticales; es el caso del dolmen, si se emplea la piedra, o de la cabaña hecha con troncos, según opinión sostenida desde Vitrubio hasta Laugier. Cuando faltan piedras o maderas de tamaños adecuados, se ha intentado resolver el problema avanzando piezas pequeñas por hiladas sucesivas sobre el hueco a cubrir, como se hizo en el Tesoro de Atreo en Micenas, de planta circular, y en las estrechas crujías de los edificios sagrados de Yucatán; con la madera se han hecho soluciones ingeniosas, que figuran en tratados de construcción del siglo XVIII, por ejemplo, para cubrir salas de dimensiones mayores que la longitud de las vigas disponibles.

En consecuencia, la acción prevista en lo primitivo como única natural es la gravedad directa, o sea la transmisión vertical de la carga. Cuando se apela a un recurso tan sencillo como es apoyar dos piedras, una contra otra formando ángulo, en forma de una V invertida, para salvar un hueco mayor que la longitud de cada piedra, se está en el principio de un invento tan importante como la rueda, el cual lleva consigo la reproducción de una acción horizontal, el empuje. En éste reside el gran problema de los arcos, bóvedas y cúpulas.

En algunos países falta o escasea la piedra y la madera. Es el caso de Mesopotamia; como se indicó al principio, parece que allí se inventó la bóveda, pero no se sabe si la idea vino de otro lugar, desconocido por ahora, o si nació en aquél. Tampoco están claros los pasos que condujeron a tan gran descubrimiento; lo cierto es que al mismo tiempo que ésta hubo de inventarse el ladrillo.

Otro punto oscuro es el origen del «iglu» de los esquimales, perfecta cúpula hemisférica formada por bloques de hielo colocados en espiral des-

de la base hasta la clave; se conoce la herramienta especial con que se cortaban éstos.

## **2. PARALELO HISTORICO ENTRE EL ARCO Y LA CERCHA ATIRANTADA. RECHAZO O DESCONOCIMIENTO DE AMBOS SISTEMAS EN LA GRECIA CLASICA Y EN LA AMERICA ANTIGUA.**

En la historia más conocida se encuentra el hecho curioso de que las estructuras de fábrica y de madera que producen empujes se dan a la vez en países y épocas determinados, en tanto que las que no los producen se emplean simultáneamente en otros lugares y tiempos.

El más insigne de estos últimos es la Grecia clásica. En la Acrópolis de Atenas todo es adintelado, pero a pesar de la excelente calidad del mármol pentélico hubo que apelar a recursos extraños para salvar la gran luz del tramo central de los Propileos. Este tramo tiene además la sobrecarga del frontón en su mayor altura. La solución consistió en aligerar la carga sobre el arquitrabe mediante vigas de hierro forjado de sección rectangular colocadas en cajas abiertas en el mármol; podían haber hecho arcos de descarga ocultos tras el friso, como en el templo de Saturno del Foro Romano, pero no conocían este sistema, o lo rechazaban por motivos ignorados, ya que no habrían de verse los arcos y por tanto no afectaban a ningún principio estético.

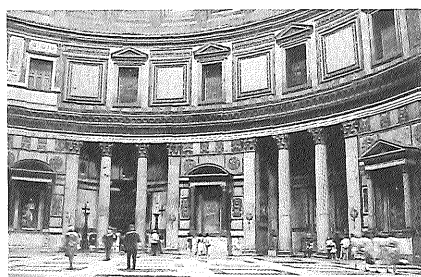
Al mismo tiempo, la «naos» del Partenón se cubrió con una armadura formada por vigas de madera cuya sección se supone, por comparación con otros templos donde se conservan las cajas donde apoyaban, que sería de 0,70 × 0,50 metros. En el centro de estas vigas cargaba un pilar, también de madera, y sobre él las vigas inclinadas que mediante correas y otras piezas sostenían la cubierta de tejas de mármol. Tan pesada estructura es extraña en un lugar donde había carpinteros de ribera capaces de construir las famosas, por ligeras, naves de comercio y de guerra; no conocieron, en cambio, las cerchas de pares y tirantes.

En la América antigua se repitió este fenómeno. Culturas tan elevadas como la de los mayas de Yucatán y Guatemala no hicieron estructuras que produjeran empujes; hicieron huecos en forma de arcos, pero los construyeron avanzando hiladas en voladizo, y procedieron del mismo modo al cubrir crujías, como se ve en Uxmal, por ejemplo. También aquí se encuentran huecos rectangulares con dinteles de cedro sobre los que cargan fachadas de piedra; es de notar que eran pequeñas las piedras que podían obtenerse en esos países, y por tanto no servían para hacer dinteles, aunque los huecos no fueran grandes.

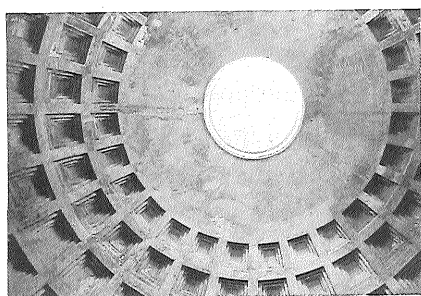
El primitivismo constructivo en pueblos tan importantes como los griegos y los mayas es un hecho inexplicable; también lo es, incidentalmente, que estos últimos no conocieran la rueda.

## **3. LA BOVEDA ROMANA. VITRUBIO (50 - 1 a. de C.) Y NERON (54 - 68 d. de C.). PIEDRA, LADRILLO Y HORMIGON.**

El invento y desarrollo de la bóveda romana se produce en muy poco tiempo; Vitrubio, en tiempo de Augusto (63 a. de C. - 14 d. de C.), no conoce más que los rudimentos de la construcción abovedada a la manera



3.1



3.2

Figura 3.1. Interior del Panteón de Agripa. Roma.

Figura 3.2. Vista interior de la bóveda del Panteón de Agripa. Roma.

Figura 3.3. Planta y sección de la Basílica de Constantino en Roma.

Figura 3.4. Perspectiva seccionada de la Basílica de Constantino en Roma.

Figura 3.5. Ejemplo de arquitectura paleocristiana. Mausoleo de Santa Constanza.

etrusca, y las bóvedas decorativas de listones y mortero colgadas de vigas de madera. Con los tres emperadores siguientes, Tiberio, Calígula y Claudio, se inicia y se va desarrollando el sistema, que se encuentra completamente formado y con todos los recursos propios del mismo en tiempo de Nerón.

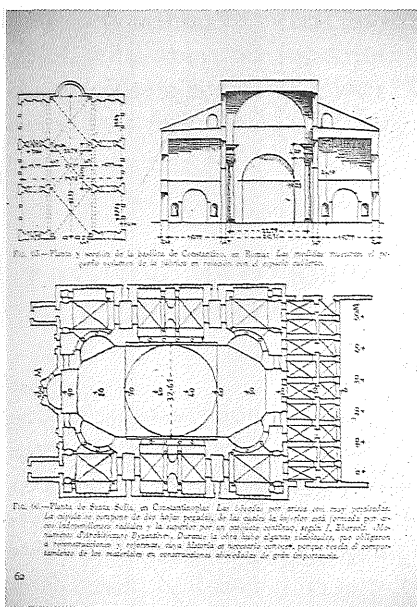
En poco más de medio siglo se pasa de la construcción helenística adintelada que explica Vitrubio a la propiamente romana de bóvedas. Se ha querido explicar tan gran innovación técnica y estética por motivos prácticos. Por ejemplo, el deseo de hacer edificios incombustibles que surgen en Roma después del incendio en el reinado de Nerón; pero durante los tres reinados anteriores se hicieron edificios abovedados cada vez más importantes. También se ha pensado en la necesidad de grandes espacios cubiertos para las multitudes que había de reunir el imperio; sin embargo, se siguieron haciendo basílicas con cubiertas de madera a la par que construcciones de bóvedas en otro tipo de edificios. Es de notar que la Basílica Ulpia de Trajano, cubierta de madera, era parecida en dimensiones y estructura a San Pablo Extramuros, que después de San Pedro es la mayor de Roma.

Por otra parte, tales teorías son inútiles para explicar esta gran invención, porque si bien «la necesidad aguza el ingenio», no produce ella de por sí el gran número de arquitectos y técnicos necesarios para crear tantas y tan importantes obras abovedadas en Roma y en todo el imperio, y para darse cuenta de sus posibilidades estéticas; la sala octógona de la Domus Aurea de Nerón es ya el germen del Panteón.

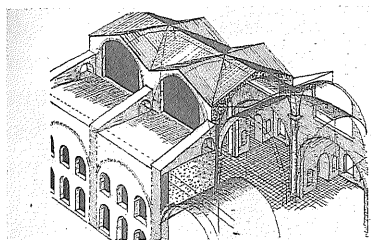
El material propio de las grandes bóvedas, y aun de muchas pequeñas, es el hormigón de cal, con puzolana a veces, formado sobre encofrados de ladrillo y madera. Los primeros forman los paramentos de los muros gruesos en muchos casos, y en otros forman un entramado de arcos en muros y bóvedas: estos arcos de ladrillo quedan visibles en los paramentos de hormigón, pero todo se ocultaba con el decorado. No está claro el papel que desempeñaban las estructuras de ladrillo; se ha pensado que reforzaban las cimbras ligeras de madera, pero en este caso sólo servirían para los arcos y para las pequeñas zonas visibles que ocupaban en las bóvedas. El resto de ellas es de hormigón, y por tanto ha de ser encofrado. También hay bóvedas en las que lo visible es ladrillo de 0,60 × 0,60 metros colocado en plano, formando una ligera estructura resistente que si, según parece comprobado, tenía el yeso como mortero, pudo haberse ejecutado sin cimbra a la manera de la bóvedas a la catalana; aunque se hubiese empleado la cal, y si hubiera necesitado cimbra ésta hubiera sido muy ligera porque la obra de ladrillo era casi suficiente para resistir el gran peso del hormigón.

También existe la hipótesis de que el sistema de arcos sirviese de directriz para la ejecución de la obra de hormigón; aquellos arcos serían hechos por especialistas, en tanto que el hormigón lo harían los peones; lo cual está de acuerdo con lo que se sabe de la organización social del trabajo en Roma.

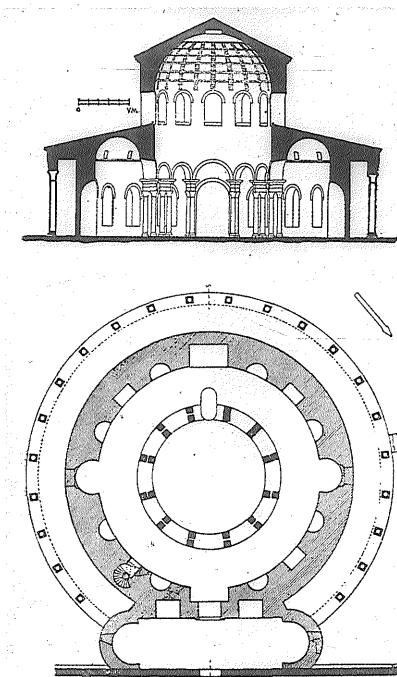
Finalmente, se piensa que en el caso de estructuras de ladrillo que pasan de un lado a otro del muro o bóveda, su objeto es dividir la masa de hormigón para evitar las grandes retracciones de fraguado que se producirían si esta masa fuese continua, sobre todo en tan importantes construcciones como el Panteón (figs. 3.1 y 3.2), las Termas y el Palatino. Se observa que en la construcción de bóvedas los romanos se ingeniaron



3.3



3.4



3.5

para simplificar y aligerar las cimbras y camones, a pesar de que su sistema llevaba consigo el empleo de grandes y pesadas masas de hormigón. Esta preocupación por reducir el empleo de la madera y de todo lo provisional se manifiesta en las estructuras y hasta en las formas proyectadas; no todas las bóvedas posibles pueden hacerse sin cimbras pesadas y costosas.

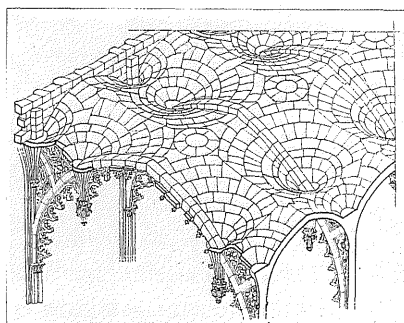
El problema de los empujes fue resuelto de varias maneras; desde luego, se excluyó el empleo de tirantes. Los contrafuertes suelen ser interiores en la parte baja, iniciando con ello una tradición que se siguió especialmente en España: como ejemplo tenemos la nave de la Catedral de Gerona, la mayor del gótico en el mundo (22 metros); en ésta, los contrafuertes quedan al exterior por encima de las capillas que ocupan el espacio entre ellas en las zonas bajas. El precedente romano más conocido se encuentra en la Basílica de Constantino (figs. 3.3 y 3.4); en ésta aparecen los contrafuertes en su parte superior como incipientes arbotantes al estar aligerados aquéllos mediante pequeños arcos.

En edificios compuestos de varias salas abovedadas se contrarrestaban unas con otras trazando la planta de modo que las bóvedas mayores estuviesen en la zona central y las menores en la periferia (fig. 3.5); los empujes se amortiguaban paulatinamente, compensando con diferencias en las sobrecargas la diferencia entre los empujes de bóvedas de distintas luces. En el Palatino, en la Domus Aurea de Nerón y en la Termas se observa este sistema, que posteriormente llevaron a su perfección los bizantinos.

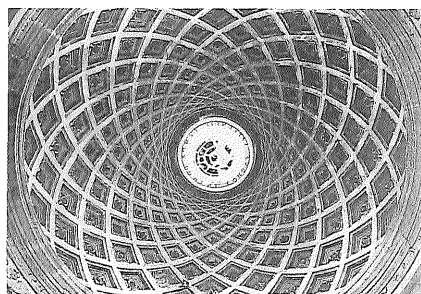
La cúpula del Panteón está aislada y ha de absorber sus empujes en la estructura de su tambor. Este es un muro muy aligerado por hornacinas exteriores e interiores; aunque su espesor es de más de seis metros (aproximadamente el séptimo de la luz del templo, 43 metros), la ligereza de su construcción contrasta con la enorme masa de ladrillo y hormigón de la cúpula que sostiene, que es completamente maciza; sin embargo, la existencia de 1800 años sin averías, a pesar de varios terremotos, demuestra que su proyecto era perfecto.

También se disminuía el empuje aparejando los riñones del arco o bóveda con hiladas horizontales avanzando en voladizo, que hacían menor la luz. Una variante que se observa en el Mercado de Trajano en Roma consiste en apoyar cada arranque de las bóvedas por arista que forman la nave sobre la ménsula cuyo frente avanza medio metro aproximadamente con un ángulo de treinta grados; tan atrevida solución ha requerido ser consolidada en nuestros tiempos con abrazaderas de hierro. Quizás inspirado por esta bóveda, propuso Viollet-le-Duc un sistema de arcos sin empuje: el arco apoyaría con toda su carga vertical sobre la ménsula, que actuando como una palanca produciría un par de fuerzas; siendo el punto de apoyo el borde interior del muro, el brazo exterior de aquella palanca produciría una fuerza hacia arriba que se contrarrestaría con la parte del muro construida sobre la zona de apoyo. Afortunadamente no fue construido este sistema de arcos, pues un cálculo serio demostró que no se produciría el efecto imaginado por Viollet-le-Duc. No es éste el único invento para resolver el problema de los empujes, pues ha habido varios en el siglo pasado y en éste; ninguno ha tenido éxito.

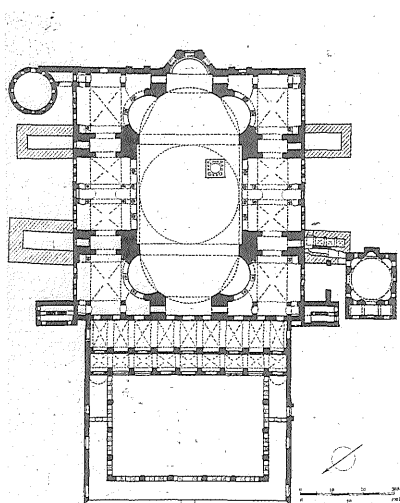
También se ha intentado evitar los empujes en las armaduras de madera; en Inglaterra existe desde la Edad Media un sistema muy ingenioso,



3.6



3.7



3.8

Figura 3.6. Arquitectura gótica. Abadía de Westminster. Capilla de Enrique VII. Esquema de construcción de bóveda.

Figura 3.7. Castillo de Amet. Philiberto de L'Orme.

Figura 3.8. Planta de Santa Sofía de Constantinopla.

cuyo ejemplo mayor es el gran Westminster Hall de Londres (fig. 3.6), donde se aprecia su relativo éxito; los muros fueron reforzados desde tiempos antiguos. Tampoco resuelven el problema los por otra parte admirables arcos de Filiberto de l'Orme (fig. 3.7), en el siglo XVI, obras maestras de la carpintería.

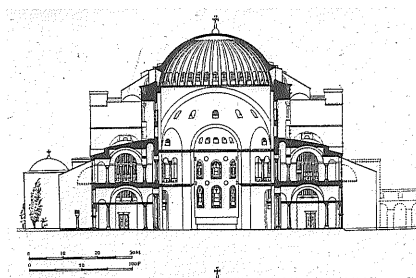
#### 4. LA BOVEDA BIZANTINA Y SU DESARROLLO EN ORIENTE Y OCCIDENTE. CATALUÑA, ROSELLON Y EXTREMADURA. LA VERSION HISPANO-ARABE.

En su *Historia de la Arquitectura* (1903) Auguste Choisy establece, con esa claridad algo exagerada que le caracteriza, que la diferencia entre la bóveda romana y la bizantina consiste en que la primera se «moldea» y la segunda se «construye»; lo típico de la romana es el hormigón vertido en moldes de madera o sobre estructuras ligeras de ladrillo. En este último caso, acabada la obra de ladrillo, que en general adquiere estabilidad propia y puede prescindir de la cimbra, se tiene ya el germen de lo bizantino y hasta de la bóveda moderna a la catalana.

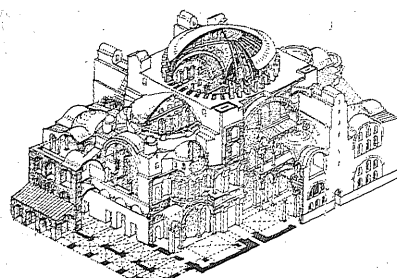
La construcción bizantina comprendió la capacidad resistente de la bóveda romana de ladrillo a rosca, sin necesidad de reforzarla con hormigón, y con esta idea pudo obtener una ligereza que pocas veces habían conseguido los propios romanos: es sin embargo notable que la Domus Aurea de Nerón, una de las más antiguas grandes obras abovedadas, sea tan ligera y tan ingeniosa como las mejores construcciones bizantinas posteriores en cinco siglos.

De modo análogo, la construcción a la catalana hizo uso de la extraordinaria resistencia de la bóveda de ladrillo a tabla, que los romanos habían empleado sólo como refuerzo de la cimbra; el sistema se completó con la aparición de la rasilla y del cemento en tiempos modernos, y permitió nuevas soluciones que aventajan económicamente al hormigón armado en muchos casos. En estas formas nuevas se emplea el hierro en zunchos y tirantes, como ya se había hecho con la madera y a veces el propio hierro en tiempos anteriores, pero con mayor facilidad que en éstos. En lo bizantino es de señalar el empleo de tirantes y codales de madera en arquerías secundarias pequeñas, pero no en las estructuras principales, cuya estabilidad se confiaba a la obra de ladrillo; la arquitectura musulmana heredó el sistema de las primeras y lo empleó en mezzitas del tipo de la cordobesa que se hicieron en el norte de Africa y sobre todo en Egipto; en ellas, los tirantes o codales de madera están decorados frecuentemente con tallas y pinturas. En España, por el contrario, no se admitió nunca el empleo de tirantes a la vista, ni de madera ni de hierro, a pesar de que estos últimos se emplearon en Italia durante el Medioevo y principios del Renacimiento. La construcción a la catalana ha seguido esta tradición española y sólo emplea tirantes en naves de talleres y almacenes.

El procedimiento romano de contrarrestar empujes de grandes bóvedas rodeándolas de otras menores y también de contrafuertes, cuando éstos contribuyen a la belleza de la composición interior y exterior, es perfeccionado por los bizantinos y llevado a su extremo en Santa Sofía de Constantinopla (fig. 3.8), en el siglo VI. La ligereza de esta construcción es conocida, aunque algunas de sus estructuras fueron en su origen más esbeltas y hubieron de ser reforzadas en tiempos antiguos a causa de va-



3.9



3.10



3.11

rios terremotos; la cúpula se hundió en el primero de éstos, y según parece se reconstruyó con mayor flecha que la original.

El sistema de contrarrestos en el eje-oeste consiste en dos medias cúpulas rodeadas por otras bóvedas menores; en el eje norte-sur, por dos enormes contrafuertes a cada lado unidos por un arco de gran sección (figs. 3.9 y 3.10).

El material empleado, en general, es el ladrillo. Los cuatro pilares de la cúpula central son de piedra, con las juntas horizontales de plomo en vez de mortero; ésta es la opinión común de los que han podido estudiar esta estructura, y se explica tal precaución si se consideran las medidas: el diámetro es 32,60 metros y la altura 54,80 metros (según Banister Fletcher); este diámetro es un poco mayor que el de San Francisco el Grande de Madrid, cuya altura es igual al diámetro, y además esta cúpula apoya en un tambor circular, en vez de en cuatro puntos como la de Santa Sofía.

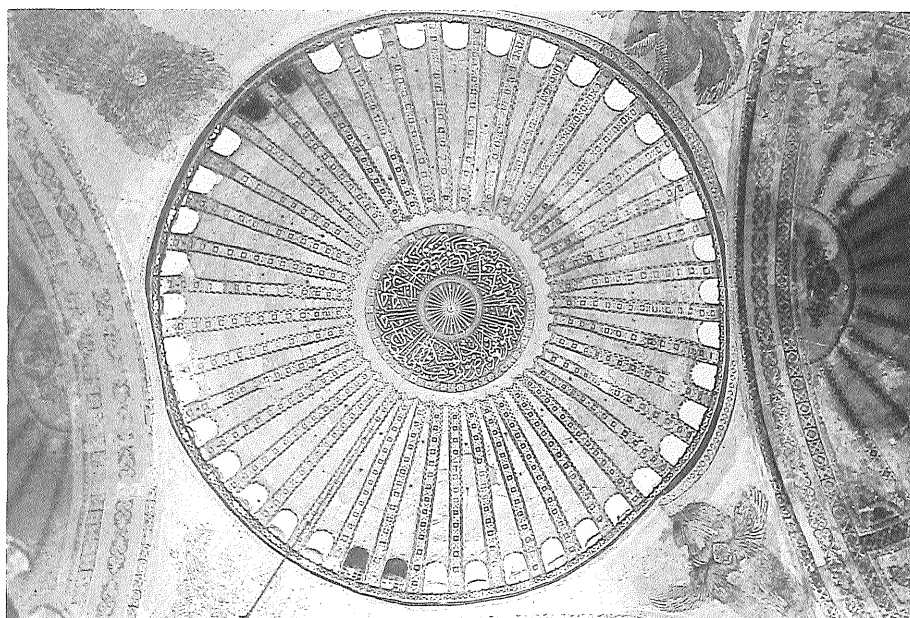
Las bóvedas son de ladrillo a rosca con mortero de cal. En la cúpula, los tendeles no parecen ser normales a la superficie de ésta, sino que tienden a inclinarse lo menos posible para facilitar la adherencia de cada anillo sobre el inferior, y hacer así posible la construcción sin cimbra. Los bizantinos, como los romanos, añadían al mortero de cal otras materias para mejorar su fraguado, su resistencia o su impermeabilidad: la puzolana ya citada, arcillas, ladrillos machacados o restos de cerámica pulverizados; estos últimos se encuentran en Santa Sofía (figs. 3.11 y

Figura 3.9. Sección transversal de Santa Sofía de Constantinopla.

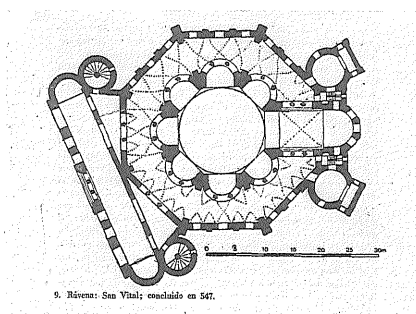
Figura 3.10. Perspectiva seccionada de Santa Sofía de Constantinopla.

Figura 3.11. Vista exterior de Santa Sofía de Constantinopla.





3.12



3.13



3.14

3.12). En cuanto al ladrillo empleado en este templo, se cree que es el normal incluso en las bóvedas, pues no se han encontrado los de poca densidad hechos de arcillas especiales. Tampoco aparecen aquí los tubos o vasijas de barro que se emplearon en las bóvedas de San Vital de Ravena y en otras muchas, incluso romanas, para disminuir el peso y el empuje; son el precedente de la rasilla y del ladrillo hueco (figs. 3.13 y 3.14).

En conclusión, se observa que la arquitectura bizantina avanzó sobre la romana en la solución de los dos problemas económicos que plantea la construcción de bóvedas: los empujes y las cimbras. Para ello se valió de todos los recursos de la arquitectura, desde el modo de componer el edificio en el proyecto hasta la elección, y a veces la invención, de los materiales y medios auxiliares. De este modo fue constituyendo un estilo de construir que se introdujo en la zona de Cataluña y Rosellón, y se conservó en su arquitectura popular a través de los siglos; la arquitectura «culta», por el contrario, se dejó arrastrar por la corriente europea del románico y por la construcción en piedra que parece natural en ese estilo. De todos modos, también el románico debe a lo bizantino más que a lo romano, especialmente en el sistema de transmisión de empujes por medio de la organización del edificio.

Es importante la versión popular de la bóveda antigua que se practicó en Extremadura hasta nuestro siglo: Se hacía un solo tablero de ladrillos grandes delgados, más bien losas, cogidos con yeso y sin cimbra, en

Figura 3.12. Vista interior de la bóveda central de Santa Sofía de Constantinopla.

Figura 3.13. Iglesia de San Vital. Rávena. Planta.

Figura 3.14. Iglesia de San Vital. Rávena. Vista exterior.



forma de bóveda vaída; sobre él se formaba un macizo de hormigón de cascote, a veces con escorias y carbonilla, y pobre en cal y arena. Los empujes se resolvían en los muros de tapial de gran espesor. El sistema tiene más aspecto romano que bizantino.

Lo bizantino, por el contrario, tuvo su más refinada versión en las escaleras, precedentes de las modernas a la catalana, que se hacían en Cataluña, Valencia y Baleares; durante el siglo XVIII se construyeron algunas que pueden considerarse piezas únicas en la historia de la arquitectura por su belleza y elegancia. Sus bovedillas eran tableros sencillos o doblados de ladrillo macizo; en el primer caso, el alarde constructivo llega a la temeridad, pero han resistido hasta ahora. La versión hispano-árabe de lo bizantino no limita su interés a los monumentos de este estilo. Los procedimientos constructivos se aplicaron en la arquitectura vernácula, como debió ser en el caso citado de Extremadura, en el estilo románico y más tarde en la Capilla de Talavera del claustro en la Catedral de Salamanca, donde los arcos se decoran caprichosamente; en estos últimos casos se aplicó la bóveda de arcos cruzados derivada de los modelos de la Mezquita de Córdoba; la que precede al *mihrab* está fechada en el año 965, y no se conoce con seguridad ninguna más antigua, aunque hay algunas en Oriente Medio que pudieran ser aproximadamente contemporáneas de las cordobesas. Posteriores hay muchas en la India musulmana, llegando el sistema hasta 1656, como fecha segura; entre ellas es famosa por su atrevimiento la del Mausoleo de Mahmud Abul Shah en Bijapur, que cubre un cuadrado de 41 metros, según Batley (*Indian Architecture*, 1948), con la particularidad de que los arcos cruzados dejan en el centro un círculo de 37 metros de diámetro para una gran cúpula, en vez del pequeño óculo normal en España.

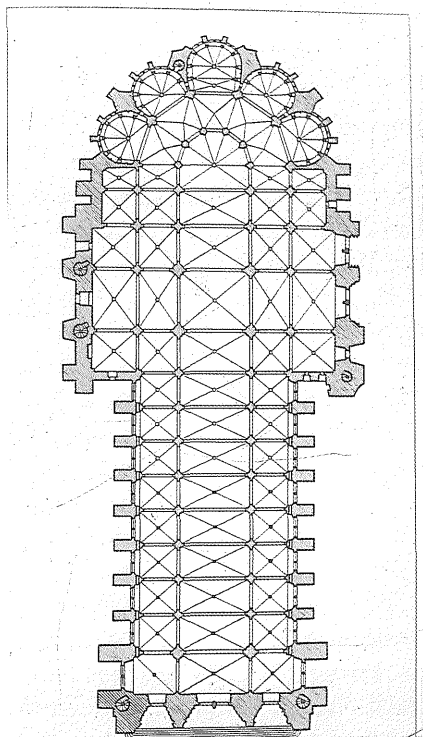
El tipo de cúpula de dos hojas de ladrillo a rosca dejando hueco entre ellas y unidas por costillas y enlaces de igual fábrica se encuentra en la Mezquita de Sultanieh, Persia, según Choyssi; tiene 25 metros de diámetro y prefigura de un modo notable la de Brunelleschi, aunque éste no pudo tener noticia de aquella.

Volviendo a la comparación entre las obras de fábrica y de carpintería, debe recordarse que la misma estructura de esta cúpula se encuentra en la Mezquita de la Roca en Jerusalén, pero realizada en madera con la técnica de los carpinteros de ribera, según opinan los que han podido estudiarla, ya que el sistema de costillas no es visible por quedar entre las dos hojas.

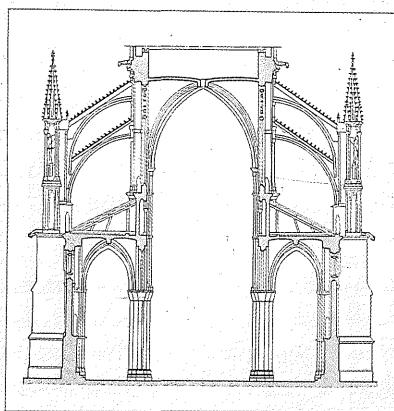
Cúpulas de madera se hicieron en el estilo hispano-árabe y en el mudéjar, pero su técnica es diferente de ésta, ya que corresponde más bien a la «carpintería de lo blanco» de López Arenas. Existen además falsas bóvedas con las nervaduras talladas en bloques de madera, sin ningún propósito estructural, como la instalada en el Museo Arqueológico de Madrid.

## **5. EL SISTEMA GOTICO. UTILIDAD PRACTICA DE LA FORMA ESPAÑOLA DEL GOTICO**

La solución del problema de los empujes ha evolucionado, si se permite una simplificación exagerada, desde el contrarresto por volúmenes pesados en Roma hacia el de superficies de bóvedas en lo bizantino, y des-



3.15



3.16

Figura 3.15. Catedral de Reims. Planta.

Figura 3.16. Catedral de Reims. Sección transversal.

de éste al sistema de líneas de fuerza en el gótico; las excepciones son numerosas en cada caso, pero la tendencia general es, más que innovar radicalmente, hacer patente lo que ya está en principio en lo romano: por ejemplo, las enormes bóvedas por arista de unas termas como las de Diocleciano llevan cargas y empujes a puntos concretos como en una bóveda gótica, pero en ésta el contrarresto se hace extraordinariamente visible por medio de los arbotantes y contrafuertes, que se convierten en el motivo estético que domina el aspecto exterior; en Roma, por el contrario, se disimula la solución al problema y se prefigura en parte el sistema bizantino de contrarrestos entre bóvedas, y también se anuncia el arbotante, aunque muy modestamente, en la Basílica de Constantino.

En España se hace estilo gótico de diversas maneras. En algunos casos se quiere repetir aquí lo más puro del arte de la Isla de Francia; el mejor ejemplo es la Catedral de León, que en lo esencial de su composición repite a escala menor, dos tercios aproximadamente, la de Reims (figs. 3.15, 3.16 y 3.17), pero es de notar que los elementos resistentes son proporcionalmente más robustos en ésta que en León.

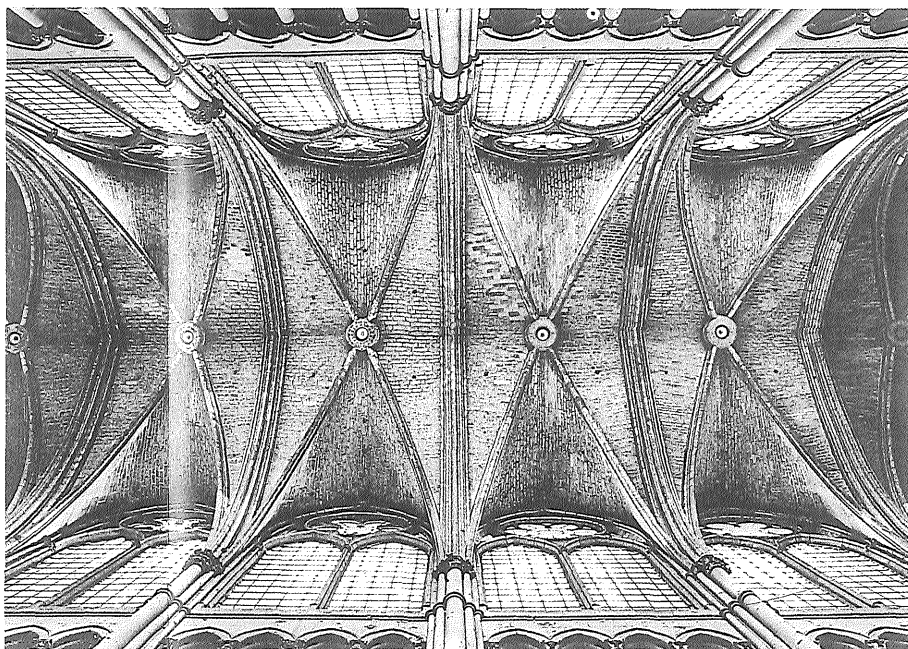
El atrevimiento estructural que se observa en León no es único en España, dentro de nuestra interpretación del gótico ortodoxo. Un caso curioso entre muchos es la extrema delgadez de los arbotantes de la Iglesia parroquial de Lequeitio; como están sometidos a la corrosión del aire del mar su escasa sección es temeraria, pero al parecer no han necesitado reparaciones importantes desde su construcción.

Estos atrevimientos son extraños cuando se carece de la experiencia que poseían los arquitectos franceses, tal como la describe Choisy en su obra citada; pueden seguirse en ellos los pasos que condujeron a la solución de tan atrevido sistema de contrarresto (figs. 3.18 y 3.19).

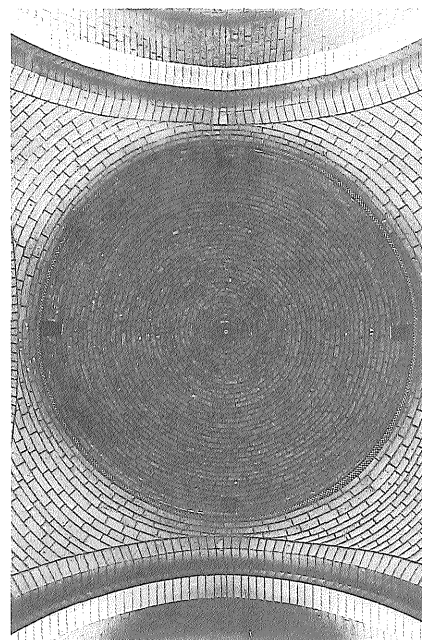
Otra forma de estilo gótico es la de Cataluña, Rosellón, Provenza, Baleares, y en general las regiones levantinas de influencia clásica. En éstas tiene poca aceptación el modelo de la iglesia de nave central muy alta y laterales bajas, que exigen emplear el sistema de arbotantes antes referido. Aquí se prefiere evitar este contraste de alturas para acercarse, por el contrario, a la creación del espacio unitario, aunque sean precisos los pilares como en el caso anterior, pero en éste sostendrán bóvedas de altura parecida que hacen menos importantes los arbotantes como determinantes del aspecto exterior del edificio, aunque en general siguen siendo necesarios.

De este modo, los grandes arbotantes de la Catedral de Palma de Mallorca (figs. 3.20, 3.21 y 3.22), uno de los mayores templos de piedra existentes en el mundo, apenas tienen importancia en la vista principal, que es el costado recayente a la bahía; la apretada fila de contrafuertes grandes y pequeños es el motivo más interesante de la fachada. Es lo contrario de la vista de Notre Dame de París, donde los arbotantes de gran luz del ábside forman el tema que se impone al espectador; los ve como remos del navío sugerido por este aspecto de la catedral. La comparación entre estos dos casos contrarios se hace poco menos que obligada por la situación de ambas catedrales, al borde del agua y contando, al parecer, con ella, para componer sus fachadas.

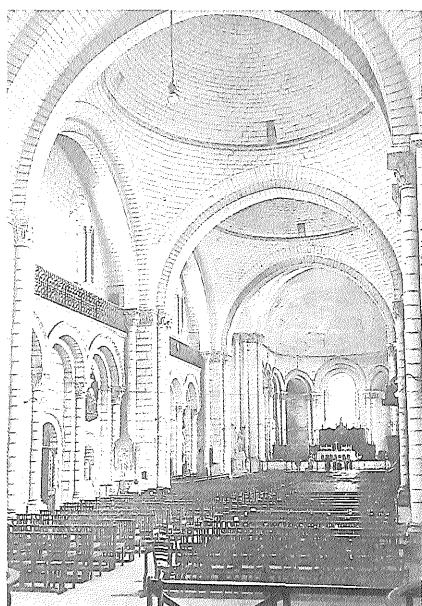
El último paso para evitar los arbotantes es la iglesia-salón o *Hallenkirche* alemana, de tres naves iguales en altura. Las lonjas levantinas son también de este tipo, y sus estructuras son más atrevidas aún que las iglesias, con ser éstas en general verdaderos alardes de ligereza en sus



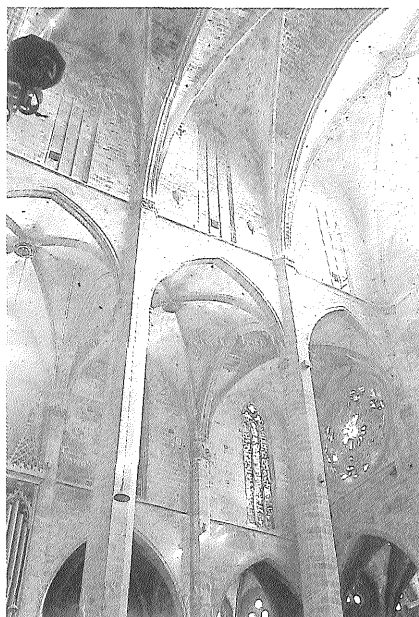
3.17



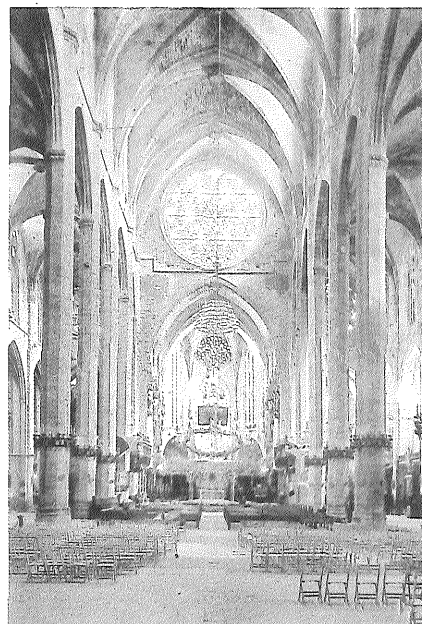
3.18



3.19



3.20



3.21

Figura 3.17. Catedral de Reims. Vista interior de las bóvedas.

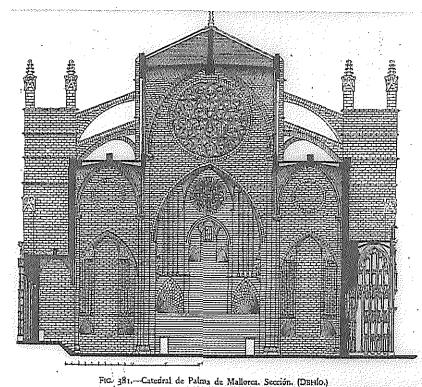
Figura 3.18. San Pedro de Angulema. Una de las cúpulas de la nave.

Figura 3.19. San Pedro de Angulema, siglo XII. Vista del conjunto interior.

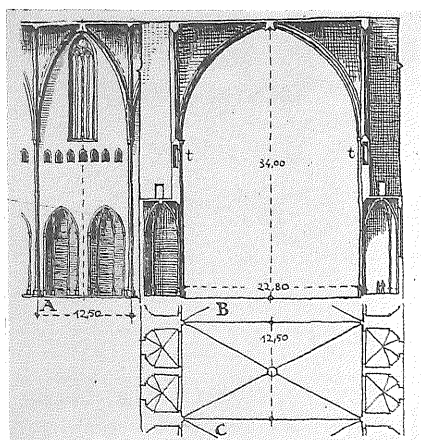
Figura 3.20. Catedral de Palma de Mallorca. Interior.

Figura 3.21. Catedral de Palma de Mallorca. Vista de la nave central desde los pies.

Figura 3.22. Catedral de Palma de Mallorca. Sección transversal.



3.22



3.23

pilares y contrafuertes; como ejemplo puede citarse la elegante Iglesia parroquial de Marquina, en Vizcaya, entre las muchas de este tipo existentes desde esa región hasta el Mediterráneo. Entre ellas debe incluirse la citada Catedral de Palma, aunque sus naves no sean de igual altura, porque la extraordinaria esbeltez de sus pilares octogonales hace de ella un verdadero salón, un espacio único de incomparable grandeza; en éste se ha alcanzado el límite de ligereza posible en una estructura de piedra con bóvedas de grandes luces, según ha demostrado el cálculo moderno.

Un caso notable de *Hallenkirche* es la Frauenkirche, Catedral de Munich; es obra de ladrillo, incluso sus pilares octogonales semejantes a los de Palma, y aunque las dimensiones de las bóvedas no son grandes, el atrevimiento es notable debido al material empleado, que lo acerca a lo que puede hacerse con la construcción a la catalana. Los contrafuertes son pequeños y están unidos por el exterior mediante arcos que apoyan en sus cabezas y sostienen una cornisa continua, como en un edificio clásico.

Esta unión de las cabezas de los contrafuertes con arcos y bóvedas normales al eje del templo, pero por su interior, es objeto de un comentario de Choisy en su *Historia de la Arquitectura*: «La Catedral de Albi, construida en el siglo XIV en una provincia donde vivía la tradición antigua, realiza este importante perfeccionamiento». En toda la zona del Levante español, y aún en la parte central y en el occidente, se encuentran ejemplos de este sistema, pero más frecuente es que dichas bóvedas no estén a la altura de las cabezas de los contrafuertes, sino a la adecuada para cubrir capillas bajas, dejando a la vista desde el exterior las partes altas de aquéllos; es el caso de la gran nave de la Catedral de Girona (figs. 3.23 y 3.24).

Dentro del estilo gótico, y como transición al sistema a la catalana, deben ser mencionadas dos obras de Juan Bautista Lázaro, ambas en Madrid, en que se unen el mudéjar madrileño y el gótico del siglo XIX. La primera fue derribada hace algunos años; era el Convento del Beato Orozco, en la calle de Goya, al final de la acera de los impares. La importante obra de Pedro Navascués *Arquitectura y arquitectos madrileños del siglo XIX* (1973), incluye este interesante párrafo de la descripción publicada en la *Ilustración Española y Americana* del 15 de febrero de 1887: «en ella [por primera vez en Madrid y quizás en España] se utiliza el hierro para la crucería de la bóvedas, hechas en sus plementos de loseta de Bisbal y dispuestas para sostener directamente la cubierta sin intermedio de armadura alguna».

La segunda obra de Lázaro que debe mencionarse es la Iglesia de San Vicente de Paul, en la calle de García de Paredes; de estructura normal dentro del gótico, carece de arbotantes y sus contrafuertes son de pequeño volumen. En la descripción publicada en *Arquitectura y Construcción*, n.º 162 (1906), se explica que la simplificación del sistema de contrarresto empleado, en contraste con lo habitual en el gótico de piedra, se debe a que la ligereza de la fábrica de ladrillo produce empujes mucho menores. En resumen, se observa que la versión española del gótico, desde el final de la Edad Media hasta el siglo pasado, ha querido simplificar el problema de los empujes mediante la propia composición del templo, que renuncia al contraste excesivo entre las alturas de la nave central y las laterales, incluso en catedrales tan importantes como las de Toledo, Palma y Sevilla; se desarrolla la forma de «salón» con bóve-

Figura 3.23. Catedral de Girona. Sección.

Figura 3.24. Catedral de Girona. Dibujo del interior.

das góticas en iglesias de diferentes estilos, desde la época propiamente gótica hasta el barroco final de mediados del siglo XVIII. En este último tiempo (1743-1764) se construye la Iglesia de Santa María en San Sebastián, con luces entre ejes de pilares de 15 metros en la nave central y 9 metros en las laterales, aproximadamente; es una hermosa obra de piedra, y no obstante sus grandes dimensiones, los contrafuertes totalmente interiores tienen sólo 3,50 metros, incluido lo que forma parte del muro de un metro de grueso por término medio. Esta iglesia, junto con la Catedral de Palma, Santa María del Mar en Barcelona y las lonjas mencionadas antes, puede contarse entre los edificios de piedra existentes con menores secciones de pilares y contrafuertes en relación con la superficie cubierta.

## **6. EL HORMIGÓN ARMADO DESDE PERRET HASTA CANDELA, EL HIERRO: DE BELANGUER A B. FULLER**

Las bóvedas de hormigón armado se pueden clasificar en dos grupos: las que repiten formas que se han realizado en todo tiempo con materiales antiguos, tales como el ladrillo, la piedra, el hormigón en masa, incluso la madera, y las que no pueden hacerse más que con el nuevo sistema; en algunos casos, estas últimas han abierto el camino para hacer nuevas formas con materiales antiguos.

Las del primer grupo sustituyen aquellos materiales con el nuevo, en busca de mayor ligereza y resistencia; sobre todo, resistencia a las vibraciones que arruinan fácilmente las obras de piedra y, aunque menos, las de ladrillo. También resuelven mejor el problema de los empujes, incluso cuando se hacen formas tradicionales de bóvedas, pues con su realización en hormigón armado puede cambiarse el sistema de contrarrestos con ventaja en todos los órdenes, especialmente en el económico. En lo que a veces no hay ventaja es en la necesidad de encofrar el hormigón, operación costosa que se evita en las bóvedas de rasilla que, como es sabido, no deben hacerse sobre camones, sino al aire sobre guías de madera o simplemente cuerdas.

Las bóvedas rebajadas de Auguste Perret en la Iglesia de Raincy (1922) pertenecen a este grupo, aunque la esbeltez de los pilares que las sostienen es propia del hormigón armado. Este tipo de estructuras se ha empleado mucho en talleres y depósitos de agua subterráneos, evitando casi siempre el empleo de tirantes.

Las bóvedas del segundo grupo, que no pueden hacerse con los materiales antiguos, presentan dos aspectos muy diferentes. El primero emplea formas aparentemente usuales, tales como la bóveda de cañón y la de rincón de claustro, pero haciéndolas trabajar de un modo nuevo. Ejemplo de la primera fue la bóveda doble del Frontón Recoletos en Madrid, obra de Torroja y Zuazo ya desaparecida por desgracia, donde los cañones no apoyaban en las generatrices como era lo habitual, sino en las cabezas de los mismos. La bóveda de rincón de claustro alargada la hizo Nervi en los hangares de Orvieto, pero no apoyándola en los cuatro lados, sino en los vértices y en los centros de dos lados del rectángulo; la bóveda es autoestable, sin apoyarse en vigas de contorno. En ambos casos se trata de bóvedas nervadas.

El mismo Nervi construyó la gran cúpula rebajada del Palacio de los Deportes en Roma, también nervada; los nervios o arcos están formados

por piezas cortas prefabricadas, y de esto depende la facilidad y la economía que se consiguió en su construcción. El resultado es muy hermoso; parece una versión en grande de las bóvedas hispano-árabes de arcos cruzados, pero en aquélla los arcos son de planta curva y de sección muy pequeña, y su número es muy grande en comparación con éstas.

Las bóvedas verdaderamente propias del hormigón armado, porque son de formas nunca vistas antes, son las que ha hecho Félix Candela. Aunque tengan algún antecedente en bóvedas laminares construidas con este material, como el mercado cupuliforme de Algeciras, obra de Sánchez Arcas y Torroja, las de Candela hacen uso original de paraboloides hiperbólicos, conoides, hiperboloides y de combinaciones entre todas estas bóvedas. La riqueza de formas que ha obtenido es asombrosa; no puede expresarse en palabras, sino mediante figuras que puedan dar idea de su belleza.

Es de notar que las bóvedas de doble curvatura que ha construido Candela en gran número resuelven el problema de acústica que presentan las bóvedas tradicionales, que sin apenas excepciones son cóncavas; esto obliga a revestirlas de algún material absorbente, a menos que se componga el local de modo que los ecos y reberberaciones de las bóvedas sean dispersados o destruidos por la profusa decoración de éstas y de los muros, o por la absorción de las maderas y lienzos de los retablos en el caso de las iglesias, y del mobiliario y tapices de los salones de música palaciega. Esto puede observarse en obras del rococó centroeuropeo, tanto religiosas como civiles, y es justo recordar que en ellas tuvo su mayor manifestación la gran música clásica a la manera de Bach, por citar sólo el nombre más conocido.

Mención aparte merecen las bóvedas de hierro; en especial las de hierro y cristal cuentan con ejemplos extraordinarios. La primera verdaderamente importante es la cúpula del Halle aux Blés en París, de diámetro parecido al del Panteón de Roma; es obra de Bélanger, que utilizó, como se ha indicado, el hierro fundido en piezas cortas bien ensambladas para los arcos meridianos, y el hierro forjado para los paralelos que habían de trabajar a tracción. Todo ello es de una ligereza extremada que hizo escuela, si bien nunca se logró conseguir la gracia y la elegancia de esta obra construida en 1808.

Otra obra maestra fue el Palacio de Cristal de Londres, obra de Paxton, en 1850. La experiencia de Paxton, como constructor de invernaderos le sirvió para resolver los problemas que las contracciones y dilataciones de la estructura metálica, de unos 450 metros de longitud, provocaría en los cristales. Para ello hizo en forma de «fuelle» las superficies de la gran bóveda central de cañón y sus cruceros, así como las cubiertas bajas de las naves laterales; los canalones de recogida de aguas y desagües se resolvieron magistralmente con la ayuda de piezas de madera. Todo era prefabricado y desmontable, como se vio cuando terminada la Exposición para la que había sido hecho fue transportado a otro lugar; desgraciadamente, fue destruido por un incendio ocurrido en nuestro siglo. En Madrid pueden citarse dos obras de Alberto del Palacio: la Estación del Mediodía y el pequeño Palacio de Cristal del Retiro; la obra de fábrica de éste es de Velázquez Bosco. La ligereza de la estructura metálica es extraordinaria, pero bien estudiada y calculada, como era de esperar en una obra del autor del Puente de Vizcaya.

Las grandes bóvedas del tipo de la citada Estación del Mediodía son



abundantes en toda Europa; su estructura constituida por arcos articulados sin tirantes suele ser de gran belleza. Estas bóvedas tuvieron su mejor época a fines del siglo pasado, cuando eran el signo de las grandes estaciones de ferrocarril y de exposiciones internacionales, como la de París en que se hizo la Sala de Máquinas con cien metros de luz. Ahora no se hacen, y en su lugar han aparecido las grandes cúpulas de Buckminster Fuller; su estructura es una novedad respecto del modelo creado por Bélanger en 1808.

La construcción de invernaderos ha seguido la marcha de las novedades que se iban produciendo en las grandes naves de hierro y cristal. En el tiempo postmoderno actual vuelven a hacerse estas bóvedas, principalmente las de cañón semicircular, cubriendo vestíbulos o salas centrales de edificios escolares y para otros usos públicos. Los medios modernos de sujeción de los cristales, sean tradicionales o plásticos, han resuelto el problema más grave de las bóvedas de hierro encristaladas.

## **7. PERDIDA PARCIAL DEL SISTEMA ABOVEDADO ANTE EL HORMIGON ARMADO**

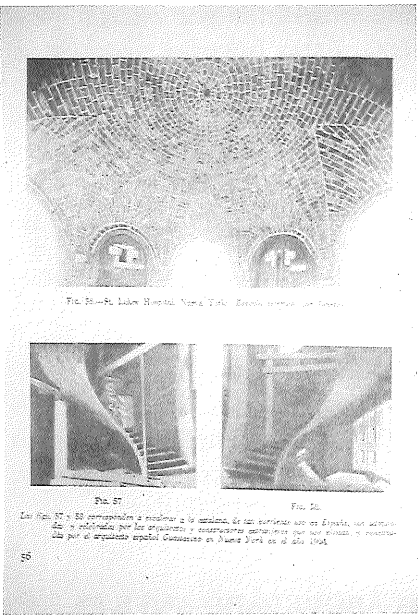
Desde su invención a fines del siglo pasado, el nuevo sistema no se redujo a las piezas rectas y planas; por el contrario, en sus principios resolvió formas curvas en las que el trabajo a tracción, posible en el hormigón armado, se unió al trabajo normal de las bóvedas tradicionales, y con ello consiguió composiciones originales. De ellas son ejemplo las escaleras construidas en los grandes patios cubiertos de algunos conocidos almacenes de París, como las galerías Lafayette y Printemps. Otra novedad es la bóveda traslúcida de nervios de hormigón y pavés, que se hizo repetidamente como cubierta de *hall* en muchos grandes hoteles; suele ser cupuliforme. No obstante la utilidad y la gracia de estas formas curvas, el hormigón armado tendió pronto hacia las rectas, debido probablemente a la dificultad de hacer encofrados curvos. La estética del movimiento racionalista influyó también en este abandono del sistema abovedado, propio de la construcción de ladrillo y también de la metálica; el triunfo de la recta llevó incluso a soluciones más costosas que las antiguas: por ejemplo, se prescindió de las escaleras abovedadas a la catalana para sustituirlas por las de tramos planos de hormigón armado, cuyo coste es de dos a tres veces mayor a igualdad de resistencia. También se dejaron de hacer bóvedas de rasilla atirantadas en naves de almacenes y talleres, para sustituirlas por cerchas o jácenes de hormigón; son más caras, y sólo son necesarias cuando han de sufrir vibraciones excesivas, o cuando por algún motivo es necesaria una terraza sobre la nave. Es de notar que no está bien estudiado el efecto de las vibraciones en las bóvedas de rasilla.

En una etapa más moderna de la arquitectura racionalista se admite la curva, sobre todo después de Ronchamp, aunque el dominio de la recta que alcanza su cumbre en Mies van der Rohe ha seguido vigente hasta que la actual tendencia postmoderna ha introducido una nueva estética.

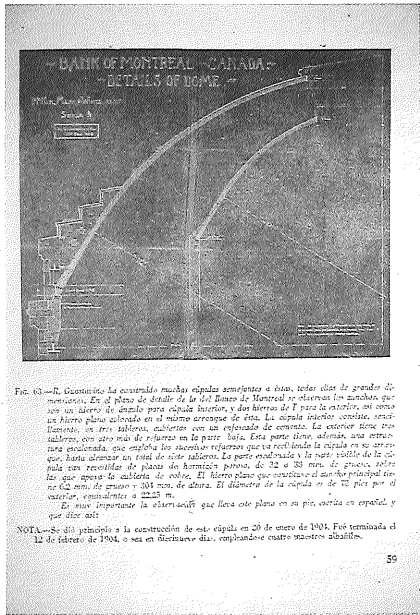
## **8. LA CONSTRUCCION A LA CATALANA**

Después de todo lo expuesto, se advierte que este sistema reúne en una síntesis genial lo aprovechable de las experiencias antiguas con las apor-





3.25



3.26

Figura 3.25. Bóvedas cerámicas de Guastavino.

Figura 3.26. Sección de bóvedas cerámicas de Guastavino.

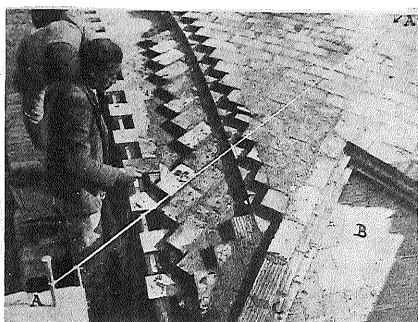
taciones modernas del ladrillo hueco y del cemento. Se siguió practicando parte de lo antiguo en algunos lugares fuera de Cataluña, como se ha indicado respecto de Extremadura y Levante; trabajando de un modo arcaico se consiguieron resultados extraordinarios, como son las escaleras mencionadas del siglo XVIII, pero fue en la zona catalana de ambos lados de los Pirineos el lugar en que se hizo actual el sistema. Es curioso que donde se construyeron las mayores bóvedas y en mayor número fue en Estados Unidos, a fines del siglo pasado y principio de éste, por obra de Rafael Guastavino; era un valenciano que estudió la carrera de arquitecto en Barcelona. En América fundó una empresa constructora que siguió actuando con su hijo hasta que se extinguió hace pocos años. Hizo bóvedas de todas clases y formas, tanto apoyadas sobre arcos de ladrillo macizo como de superficie continua en luces extraordinarias; de éstas la más notable por sus dimensiones y ligereza, construida sin cimbra, fue la provisional para el crucero de la Catedral de San Juan el Divino en Nueva York; era baída sobre un cuadrado de unos 40 metros de lado, según noticias que no han sido posible comprobar (figs. 3.25 y 3.26).

Entre los inventos que realizó Guastavino para facilitar la construcción de bóvedas y para mayor utilidad, el más interesante fue el de un tipo de rasilla absorbente del sonido, que por desgracia no ha llegado a España; resuelve el tercero de los tres problemas de las bóvedas: las cimbras o camones, los empujes y las reberberaciones y ecos.

Gaudí empleó el sistema y lo hizo avanzar, como es sabido. Como sus obras son muy conocidas, sólo se recuerda aquí una muy pequeña y provisional en que se manifiesta su fuerza creadora: la escuela aneja a la Sagrada Familia. Su bóveda era ondulada y apoyaba en muros ligeros igualmente ondulados, para conseguir la resistencia al empuje sin hacer uso de contrafuertes; el pequeño pabellón era una magnífica muestra de la estética gaudiniana, a pesar de la modestia de sus materiales.

La construcción a la catalana llegó a Madrid durante la Guerra de 1914-1918; la trajo un grupo de constructores con gran dominio del sistema, entre los que destacaban Celestino Madurell y José Grau. Hubo antes, a fines del siglo pasado, algunos antecedentes aislados, especialmente en la construcción de escaleras y naves industriales. También se hicieron varias terrazas a la catalana, y pueden considerarse como influencias esporádicas de este sistema la iglesia antes mencionada de San Vicente de Paul, obra de Juan Bautista Lázaro, y la bóveda de rasilla para la cubierta puesta por encima de las bóvedas de piedra de las Huelgas de Burgos, independiente de éstas y hecha para sustituir una vieja armadura de madera; fue obra de Juan Moya Idígoras, quien empleó esta bóveda a la catalana en vez de la armadura de hierro proyectada, debido a la escasez de este material durante la Primera Guerra Mundial.

No obstante la abundancia de antecedentes como los señalados, la expansión del sistema no se produjo hasta la instalación en Madrid de los maestros catalanes. Renovaron la construcción de casas de pisos creando un tipo que se repitió continuamente; para seis o siete plantas, la estructura se componía de muros de carga de pie y medio en planta baja y un pie en los restantes; algunos soportes de hierro aislados en el interior, cuando los muros de carga estorbaban en esos lugares a pesar de que su espesor, a veces se reducía a medio pie; para los cargaderos de los huecos se empleaban «puntas de viguetas»; forjados de doble T con bovedillas de rasilla con yeso, sin doblar en muchos casos, relleno de cascote con lechada de cemento, y cielo raso de rasilla con yeso cogiendo



3.27

medio canuto de la rasilla al ala inferior de la vigueta. Las escaleras podían ser a saltacaballo o continuas como un helicoide deformado para adaptarse a una planta rectangular. Estas últimas son de gran belleza, pero requieren ser realizadas por muy buenos oficiales. Las terrazas eran el remate obligado de la casa; se hacían con tablero y doblado de rasilla sobre tabiquillos de hueco sencillo, en los que debía apoyar sin estar ligados de ninguna manera éstos con los tableros para permitir su libre dilatación, y con este mismo objeto el borde de la terraza debía quedar suelto respecto del muro del antepecho; todo ello requería también una ejecución perfecta. La tabiquería se hacía a veces con rasilla. El edificio resultaba de una ligereza y solidez extremadas, pero era necesario completarlo con aislantes térmicos y acústicos, pues la construcción no aislaba nada de por sí; por desgracia, no todos los propietarios aceptaban este gasto suplementario.

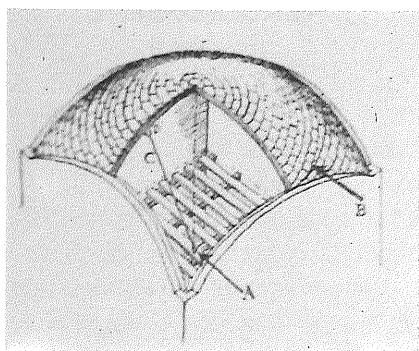
Esta sencilla y elegante construcción a la catalana se fue abandonando ante la creciente aplicación del hormigón armado, pero cuando a partir de 1939 escaseó el hierro y el cemento se volvió a ella y se hizo mayor uso de sus posibilidades; se recordaron experiencias antiguas, como las de Gaudí y Guastavino, que extendía el campo de utilización del sistema a toda clase de edificios, y se hicieron estudios sobre el mismo, empezando por la importante conferencia del profesor Buenaventura Bassegoda sobre «La bóveda catalana», leída el 26 de noviembre de 1946 y publicada el año siguiente en Barcelona.

## 9. PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS Y ECONOMICOS, CIMBRAS Y ENCOFRADOS, CONTRARRESTOS. INCIDENCIAS DE ESTAS CUESTIONES EN EL PROYECTO

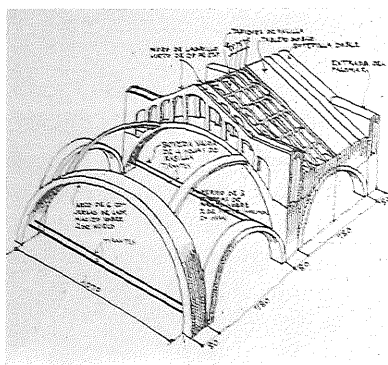
En la actualidad no existe el problema de escasez de hierro y cemento, por lo que ha desaparecido la necesidad de emplear la construcción abovedada en todos los casos posibles. Por consiguiente, pueden ahora elegirse los sistemas que sean más convenientes en cada caso; ya se ha indicado que en las escaleras corrientes es más económica la bóveda a la catalana que la construcción de hormigón armado y de hierro, y hay que añadir que su construcción es más rápida. En cambio los forjados planos actuales son mejores y más baratos que cualquier solución abovedada para un edificio de varios pisos, a no ser en casos especiales: por ejemplo, en algunos edificios escolares se hicieron durante la escasez de hierro y cemento forjados de 7,20 m de luz con vigas de hormigón armado separadas 2,40 m volteando sobre ellas bóvedas de dos tableros con flecha de un décimo de luz aproximadamente, pues variaban según las sobrecargas previstas. Es de notar que la flecha conveniente por economía y seguridad, incluso para grandes bóvedas cilíndricas, varía entre  $1/8$  y  $1/12$  de la luz; claro es que bóvedas tan rebajadas producen grandes empujes, lo que no es inconveniente si se pueden atirantar; pero en caso contrario el coste de los contrafuertes las hace impracticables, en general. Únicamente si se compone el conjunto de un sistema abovedado en estilo bizantino, de modo que los empujes vayan disminuyendo desde el centro a la periferia, pueden resolverse económicamente estos tipos de bóvedas sin tirantes.

Las bóvedas de rasilla se construyen sin cimbras, avanzando en el caso de las cilíndricas desde un muro de cabeza o una cercha, a los cuales se sujeta con yeso la primera vuelta de rasilla (fig. 3.27), que una vez ter-

Figura 3.27. Construcción de una bóveda de rasilla.



3.28



3.29

minada es estable pues trabaja como arco; a ésta se añade la segunda obrando del mismo modo, mientras otra cuadrilla va doblando la primera utilizando mortero de cemento, y así sucesivamente. Las cúpulas se hacen de la misma manera a partir del zuncho, pues cada anillo que se cierra es estable (figs. 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31).

Como guía para las cilíndricas bastan cuerdas tensadas entre el muro o cercha de cabeza y otra cercha paralela. La guía para una cúpula de casquete esférico puede ser simplemente una cuerda atada al centro de la esfera y con un tope en el otro extremo, el cual señala el radio; así hizo Guastavino la citada bóveda baída de Nueva York, y lo mismo se ha practicado en España en muchos casos, pero este procedimiento requiere una destreza extraordinaria por parte del oficial (fig. 3.32).

Cuando el perfil de la cúpula no es un arco de circunferencia, la guía es una cercha giratoria que lleva la curva calculada; se apoya en el centro sobre un castillete, y en el extremo sobre un carretón que utiliza como carril el borde del zuncho, cuya sección debe ser adecuada para este objeto.

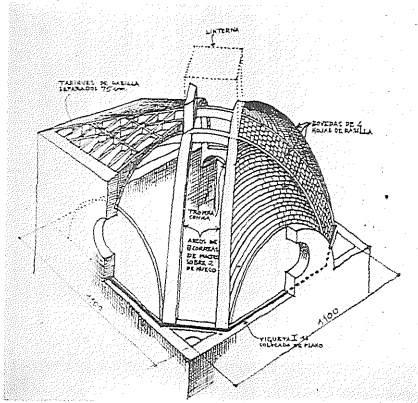
Esta construcción sin cimbra ni encofrado es muy económica. La cúpula de la iglesia de Santa María Madre de la Iglesia en Carabanchel Alto de 24 m (figs. 3.33, 3.34 y 3.35) de luz teórica (23,10 m efectiva) resultó a 10 dólares por metro cuadrado; la bóveda membrana de hormigón armado equivalente hubiera costado 35 dólares, según opinión de un grupo de técnicos del Instituto Torroja y otro grupo de norteamericanos que presenciaron su construcción. Esta cúpula tiene 4,80 m de flecha; soporta una linterna, y su grueso es de cuatro tableros de rasilla, el último de los cuales se hizo por precaución, ya que el cálculo sólo exigía como máximo de seguridad dos tableros y medio.

Las escaleras de bóveda continua, e incluso las de saltacaballo, se hacen sin cimbra ni guía; requieren la máxima habilidad de los oficiales, que más que siguiendo planos han de trabajar según su concepto de una forma tridimensional estable. Por desgracia, el oficio se está perdiendo en España desde el auge del hormigón en los años cincuenta.

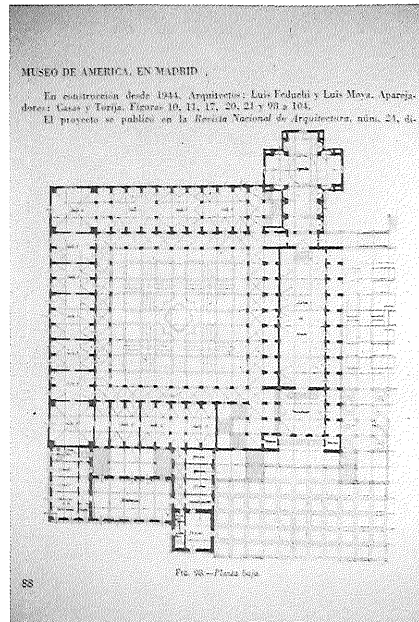
Las bóvedas-membranas de hormigón armado y sus nuevas formas han sugerido la posibilidad de hacer muchas de éstas con rasilla, evitando el coste de los encofrados que exigen aquéllas. De este modo se ha hecho un paraboloide hiperbólico de 748 metros cuadrados en la iglesia de Santa María del Pilar del Colegio de los Marianistas del barrio del Niño Jesús (1965) (figs. 3.36, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40 y 3.41). Esta forma, a la que va tan unido el nombre de Félix Candela, se ha realizado aquí en ladrillo con guías de madera que materializan una familia de generatrices; dirigen éstas la forma del primer tablero de rasilla con yeso; sobre éste se aplican tres centímetros de mortero de cemento que engloban las barras de tracción, y encima el segundo y tercer tableros, con el mismo mortero, terminando con un enfoscado. El grueso total de 14 centímetros no es suficiente para el aislamiento térmico, por lo que encima se han colocado planchas de «porespan» y sobre ellas la capa impermeable. Los arquitectos son José Antonio Domínguez Salazar y el que suscribe, y el cálculo fue realizado por el también arquitecto Luis García Amorena. Realizaron las obras cuatro oficiales con sus ayudantes y peones durante 24 días del mes de mayo; estas fechas son importantes, aunque fueron casuales, porque la creciente elevación de las temperaturas en ese mes produjo la contracción paulatina de los maderos de guía, que

Figura 3.28. Construcción de bóveda cerámica esférica.

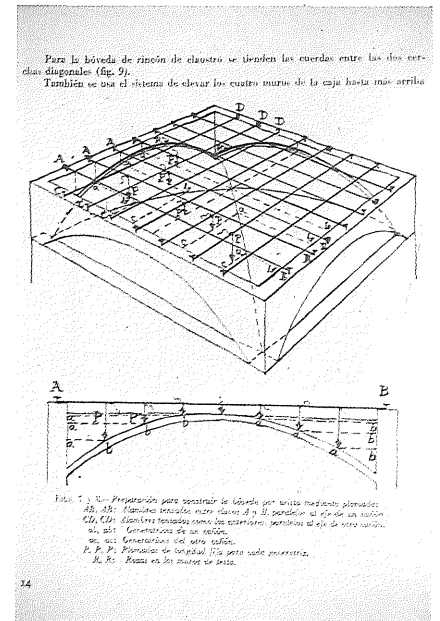
Figura 3.29. Bóvedas esféricas cerámicas contrarrestadas.



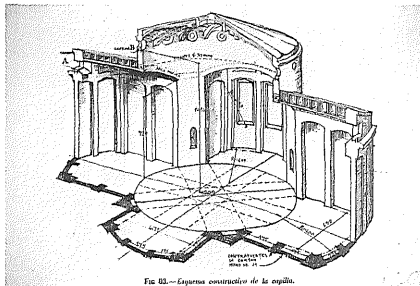
3.30



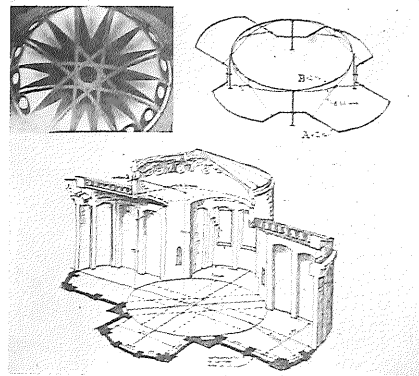
3.31



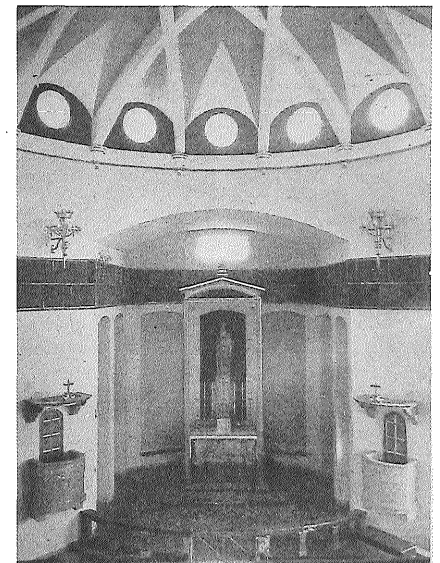
3.32



3.34



3.33



3.35

Figura 3.30. Asociación de bóvedas cerámicas.

Figura 3.31. Planta del Museo de América en Madrid. Arq. L. Moya.

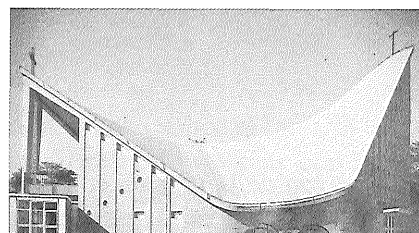
Figura 3.32. Planos de bóvedas tabicadas.

Figura 3.33. Perspectiva seccionada de ábside la iglesia del Colegio Marianista en Carabanchel Alto.

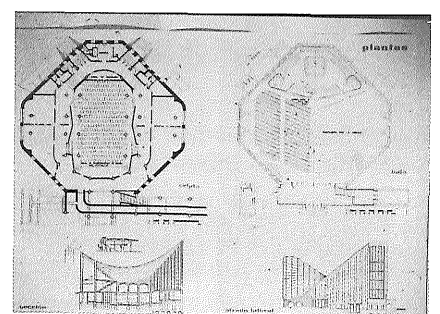
Figura 3.34. Detalle de la bóveda de cubrición del crucero de la iglesia del Colegio Marianista en Carabanchel Alto. Arq. Luis Moya.

Figura 3.35. Vista interior del ábside de la iglesia del Colegio Marianista en Carabanchel Alto.

Figura 3.36. Colegio Marianista de Santa María del Pilar. Madrid. Planta. Arq. Luis Moya y Dominguez Salazar.

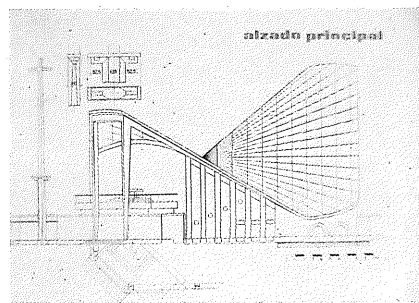


3.37

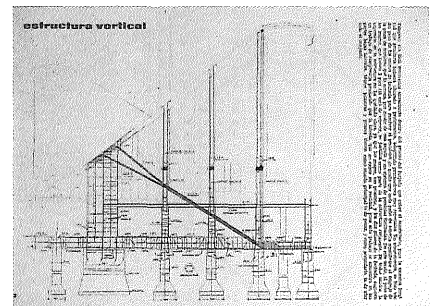


3.36

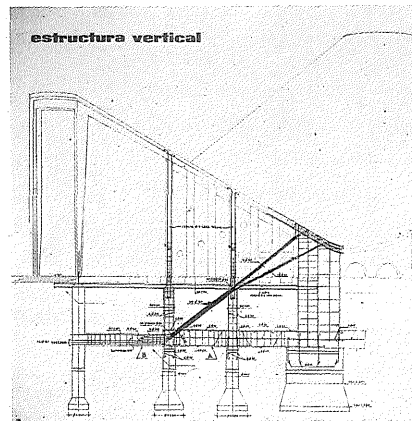
Figura 3.37. Vista lateral de la iglesia del Colegio de Santa María del Pilar en Madrid. Cubierta en parabolóide hiperbólico.



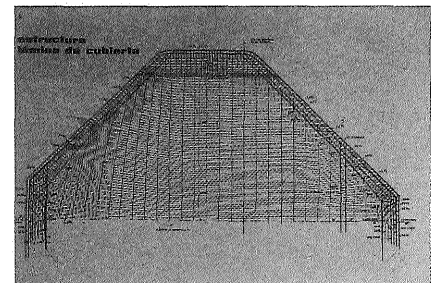
3.38



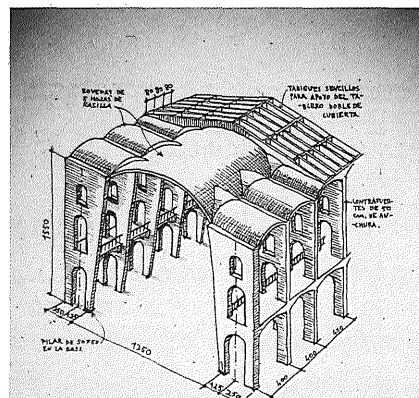
3.39



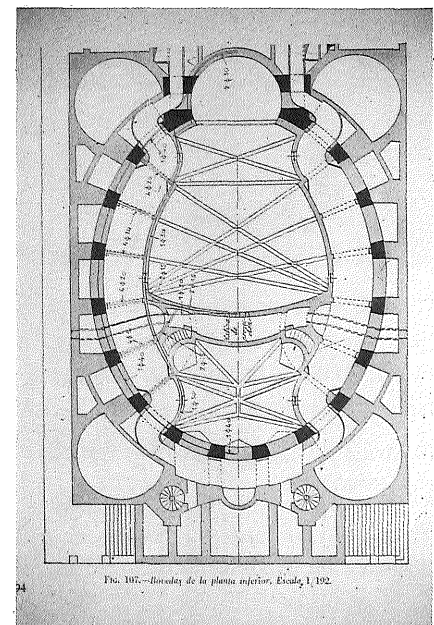
3.40



3.41



3.42



3.43

Figura 3.38. Alzado lateral de la iglesia del Colegio de Santa María del Pilar. Madrid.

Figura 3.39. Sección de la iglesia de Santa María del Pilar. Madrid.

Figura 3.40. Sección de la iglesia de Santa María del Pilar. Madrid.

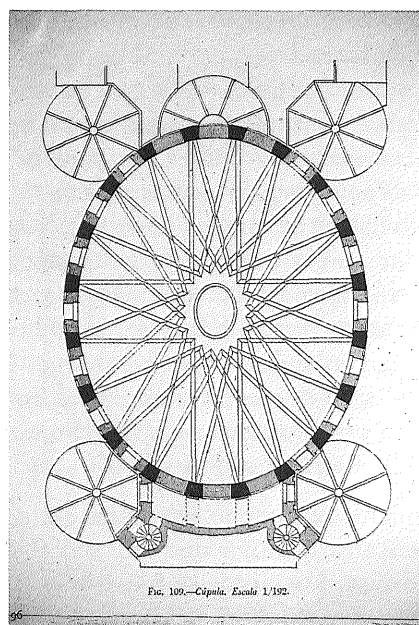
Figura 3.41. Estructura de bóveda. Iglesia de Santa María del Pilar. Madrid.

Figura 3.42. Perspectiva seccionada del Colegio de S. Agustín. Madrid. Arq. Luis Moya.

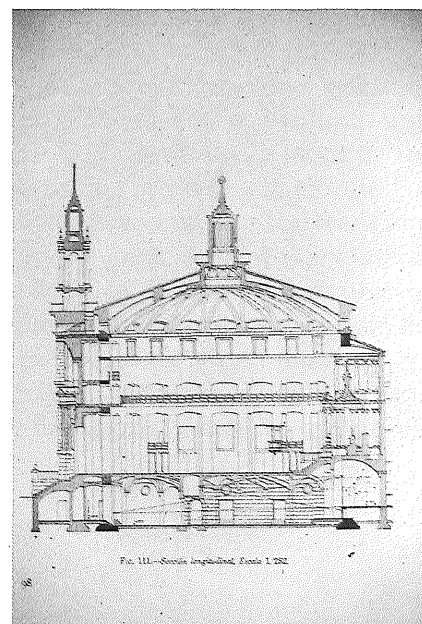
Figura 3.43. Colegio de S. Agustín. Planta de la iglesia.

se separaron de la bóveda en construcción evitando que ésta apoyase en ellos, lo que hubiera forzado su forma y obligado a un descimbramiento aventurado y quizás peligroso, al no ser posible efectuarlo todo a la vez. El problema del empuje se resolvió de un modo original, utilizando el peso de los muros como contrarresto; para ello se apoyaron éstos en zapatas colgadas mediante tirantes oblicuos empotrados en los propios muros, y por tanto invisibles. La solución, en suma, está fundada en una simple descomposición del empuje transmitido por la viga de borde, en una carga vertical sobre el cimiento y una tracción que resuelve el tirante mencionado. El resultado es bueno como construcción, pero no lo es como expresión de la verdad estructural que debe manifestarse en toda obra de arquitectura.

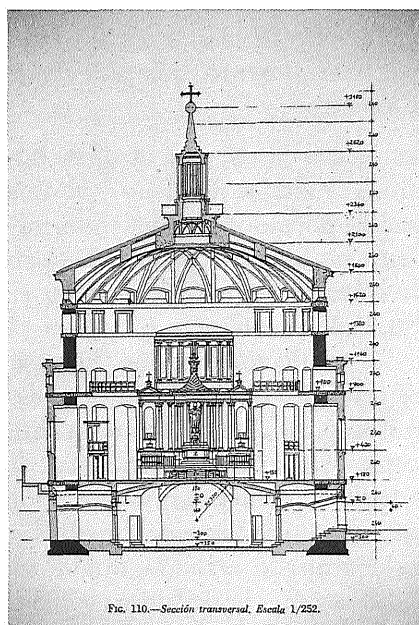




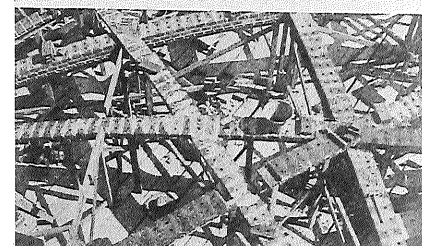
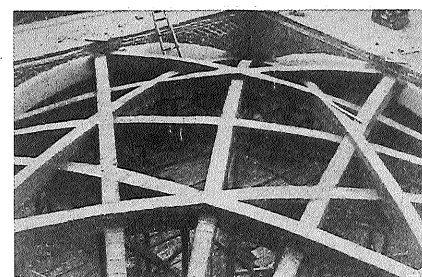
3.44



3.45



3.46



3.47

Figura 3.44. Colegio de S. Agustín.  
Planta de bóvedas.

Figura 3.45. Colegio de S. Agustín.  
Sección longitudinal.

Figura 3.46. Colegio de S. Agustín.  
Sección transversal.

Figura 3.47. Bóveda cerámica de ar-  
cos cruzados.

Las bóvedas sobre arcos a la manera musulmana y gótica resuelven casos difíciles de realizar con las formas sencillas antes mencionadas, ya sea por la complicación de la forma del local que han de cubrir, ya sea por facilitar la marcha de la obra. El inconveniente es que los arcos requieren cimbras para su construcción; con esto aumenta el coste de las bóvedas, lo que puede compensarse por la mayor sencillez de éstas, convertidas en simples plementerías.

En el caso de bóvedas cupuliformes con linternón central de mucho peso, conviene por precaución sostener éste con arcos de ladrillo macizo; en la iglesia de San Agustín (figs. 3.42, 3.43, 3.44, 3.45 y 3.46) los arcos de un pie de ancho se componen de una vuelta de rasilla con yeso, a tabla, y de nueve de macizo con cemento, también a tabla, por lo que parecen ballestas. La luz de los arcos mayores es de 24 m (la planta es elíptica),

y el número de arcos es veinte, que forman diez pares de arcos paralelos. El trazado es, por tanto, hispano-árabe. La flecha es 4,80 m o sea un quinto de la luz de los arcos mayores. El peso del linternón es de 70 toneladas; contando con esta sobrecarga, el autor del cálculo, que fue nuestro compañero Manuel Thomas, determinó como forma de los arcos hipérbolas de tercer grado. A poco de empezar la construcción de éstos, todavía con pocos tableros, empezaron a trabajar como tales arcos sin contar con la cimbra, y como faltaba el peso del linternón en la clave, ésta se elevó más de cinco centímetros sobre la cimbra, al mismo tiempo que las partes bajas del arco la aplastaban ligeramente en estas zonas; según se fue construyendo el linternón, la clave fue descendiendo hasta coincidir con la cimbra, como estaba calculado. Estos movimientos no produjeron ninguna grieta, desmostrando la flexibilidad de este tipo de fábrica.

El mismo fenómeno se repitió en la obra de Pedro Rodríguez de la Puente y Ramiro Moya que calculó el mencionado compañero Luis García Amorena. Los arcos se hicieron aquí a rosca, no a tabla, y la luz de los mayores es 40,80 m. El peso del linternón es de 250 toneladas. La clave se elevó espontáneamente más de diez centímetros, y descendió después como en el caso anterior; tampoco hubo grietas, a pesar de que la fábrica de ladrillo macizo a rosca impidió la continuidad de los tendeles de mortero de cemento, que parecían asegurar la flexibilidad en el caso de San Agustín.

En estos dos casos, y en otros de bóvedas menores, se prefirió el trazado de arcos cruzados (figs. 3.47) al de arcos convergentes en un centro o en un anillo portador de una linterna por dos motivos: primero, los arcos son enteros como en el caso de la convergencia, pero sin el inconveniente de sumar muchas acciones en el centro de la bóveda; en el caso del anillo, cada medio arco ha de apoyarse en la cimbra hasta que están todos y el anillo terminados. El segundo motivo es que en la bóveda de arcos cruzados cada uno de ellos es cruzado por todos los demás, excepto por un paralelo, por lo cual si falla una parte de alguno se espera que los otros eviten las consecuencias de esta falta. Siempre es de temer que el ladrillo, el cemento o la ejecución de la obra tengan defectos en algunos puntos; la fábrica de ladrillos ofrece en este aspecto más seguridad que el hormigón armado, donde la colocación de las armaduras queda incógnita, y que la de hierro soldado, en la que el reconocimiento de todas las soldaduras es casi imposible.

Como consecuencia de todo lo anterior, se comprende que las bóvedas a la catalana y las de hormigón armado resuelven muchos problemas, aunque no todos. No son aplicables, por ejemplo, a edificios de pisos normales, si bien son muy indicadas para viviendas unifamiliares de una o dos plantas, como demuestra una experiencia milenaria en el Mediterráneo. En el aspecto económico, pueden tener cualquier forma que convenga a su función si se permite que tengan tirantes a la vista, como se hizo sin escrúpulo en el primer renacimiento italiano. Por eso son adecuadas para naves de almacenes y talleres, aunque en estos últimos pueden producirse vibraciones excesivas que no permitan bóvedas de rasi-lla, pero sí de hormigón armado.

Las formas más económicas son las circulares y elípticas, cuyos empujes se resuelven con un simple zuncho. Debe observarse que las elípticas necesitan una sobrecarga sobre la zona del eje menor para conservar la forma del zuncho, como resulta del cálculo de los empujes a lo largo de



ambos ejes; esto las encarece respecto de las circulares. La planta cuadrada o la rectangular poco alargada son también económicas, con tal que se resuelvan con plementería sobre dos arcos cruzados; los empujes van todos a los ángulos si las plementerías forman en el conjunto una bóveda por arista, y por tanto basta unir con tirantes a lo largo de los muros estos cuatro ángulos. Si la forma es de rincón de claustro la bóveda empuja a lo largo de los muros, y requiere como contrarresto una viga colocada de plano en la cabeza de cada uno de éstos, y que las cuatro vigas queden bien enlazadas en los ángulos. Finalmente, es preciso recordar que si se quiere emplear bóvedas en un edificio, el proyecto ha de contar con ellas desde el principio para obtener economía en el resultado, como se observa en las estructuras verdaderamente prácticas de este género construidas a lo largo de la historia, desde los bizantinos hasta Guastavino y Félix Candela.

#### **BIBLIOGRAFIA**

- BASSEGODA, Buenaventura: *La bóveda catalana*. Barcelona, 1947.  
CHOISY, Auguste: *Histoire de l'Architecture*. París, 1905.  
CHOISY, Auguste: *L'Art de Batir chez les Romains*. París, 1872.  
CHOISY, Auguste: *L'Art de Batir chez les Byzantins*. París, 1882.  
CHUECA, Fernando: *Historia de la arquitectura española*. Madrid, 1965.  
FLETCHER, Banister: *A History of Architecture*. Londres, 1943.  
MOYA BLANCO, Luis: *Bóvedas tabicadas*. Madrid, 1947.  
NERVI, Pier Luigi: *Costruire correttamente*. Milán, 1955.